

УДК 621.331

**Сиченко Віктор Григорович**, д-р техн. наук, доц., завідуючий кафедрою «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, Україна, Лазаряна 2, 49010, тел. 0562471674, [elsnz@mail.ru](mailto:elsnz@mail.ru), (0000-0002-9533-2897).

**Босий Дмитро Олексійович**, канд. техн. наук, докторант, кафедра «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, Україна, Лазаряна 2, 49010, [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua), (0000-0003-1818-2490).

**Косарев Євген Миколайович**, асист., кафедра «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, Україна, Лазаряна 2, 49010, [kossik89@gmail.com](mailto:kossik89@gmail.com), ([0000-0003-3574-7414](https://orcid.org/0000-0003-3574-7414)).

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ РОЗРАХУНКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ПІДСИЛЮЮЧИМ ПУНКТОМ

*У статті проаналізовані основні способи підсилення тягової мережі постійного струму. На прикладі реальної ділянки виконані оціночні розрахунки забезпечення рівня напруги за умови встановлення підсилюючого пункту в середині міжпідстанційної зони вузлової схеми живлення. Запропоновано аналітичний спосіб розрахунку струму підсилюючого пункту, який можна застосувати для реальних реалізацій тягових струмів в умовах експлуатації.*

**Ключові слова:** електропостачання, тяга, постійний струм, рівень напруги, підсилення, розподілена система.

**Сыченко Виктор Григорьевич**, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, Украина, Лазаряна 2, 49010, тел. 0562471674, [elsnz@mail.ru](mailto:elsnz@mail.ru), (0000-0002-9533-2897).

**Босый Дмитрий Алексеевич**, канд. техн. наук, докторант, кафедра «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, Украина, Лазаряна 2, 49010, [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua), (0000-0003-1818-2490).

**Косарев Евгений Николаевич**, асс., кафедра «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, Украина, Лазаряна 2, 49010, [kossik89@gmail.com](mailto:kossik89@gmail.com), ([0000-0003-3574-7414](https://orcid.org/0000-0003-3574-7414)).

### УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УСИЛИВАЮЩИМ ПУНКТОМ

*В статье проанализированы основные способы усиления тяговой сети постоянного тока. На примере реального участка выполнены оценочные расчеты обеспечения уровня напряжения при установке усиливающего пункта в середине межподстанционной зоны узловой схемы питания. Предложен аналитический способ расчета тока усиливающего пункта, применимый для реальных реализаций тяговых токов в условиях эксплуатации.*

**Ключевые слова:** электроснабжение, тяга, постоянный ток, уровень напряжения, усиление, распределенная система.

**Sichenko Victor Grigorovich**, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., Head of the Power Supply Department, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, Ukraine, 2 Lazaryana Street, 49010, tel. 0562471674, [elsnz@mail.ru](mailto:elsnz@mail.ru), (0000-0002-9533-2897).

**Bosiy Dmitry Alekseevich**, Cand. Sc. (Eng.), Postdoctoral student, Power Supply Department, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, Ukraine, 2 Lazaryana Street, 49010, [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua), (0000-0003-1818-2490).

**Kosarev Evgeniy Nikolaevich**, TF, Power Supply Department, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, Ukraine, 2 Lazaryana Street, 49010, [kossik89@gmail.com](mailto:kossik89@gmail.com), ([0000-0003-3574-7414](https://orcid.org/0000-0003-3574-7414)).

### THE METHODOLOGY IMPROVEMENT FOR CALCULATING THE DISTRIBUTION TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM WITH ENHANCED POINT

*The existing methods of enhancing the centralized DC traction power supply systems don't provide a sufficient level of the voltage at the different operating conditions. Alternatively the distributed power supply system with using autonomous enhancing points on electrified line may provide the required voltage mode. The distributed power supply system also allow to regulate the voltage in the fixed range. The methodology used in this work shows that the voltage in the traction network may be regulated by a certain value of the current and the quantity of the enhancing points. The*

*results that obtained in this work provide the methodological basis for the distributed power system of the DC traction network with enhancing points and allow to control the each of them in a real time in a common system of intellectual power supply.*

**Keywords:** power supply, traction, direct current, voltage level, enhancing, distributed system.

### Введение

На существующих электрифицированных направлениях система электроснабжения постоянного тока напряжением 3,3 кВ вносит ограничения пропускной способности, связанные с уменьшением напряжения на токоприемнике электровоза ниже нормального эксплуатационного значения 2700 В для грузового и 2900 В для скоростного движения поездов, что приводит либо к потере скорости движения поезда, либо к перегреву проводов контактной сети, вызывающему, в свою очередь, потерю их механической прочности.

Возможное несоблюдение режима напряжения, а также значительные потери энергии в контактной сети обязывают службы эксплуатации применять ряд мер, улучшающих технико-экономические показатели работы системы электроснабжения тяги и всего электрифицированного участка.

Основными вариантами усиления, применяемыми в условиях эксплуатации, являются: включение пунктов параллельного соединения, применение мощных двенадцатипульсовых преобразовательных агрегатов, увеличение сечения контактной подвески и введение устройств регулирования напряжения на тяговых подстанциях.

На длинных межподстанционных зонах грузонапряженных участков увеличение сечения контактной сети не дает нужного эффекта. Имеется возможность повышения эффективности существующих централизованных систем электроснабжения за счет регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций благодаря современным преобразователям на основе IGBT-тиристоры и IGBT-транзисторов, отличающихся высоким быстродействием и экономичностью. Но, в ряде случаев, на длинных межподстанционных зонах даже внедрение системы регулирования напряжения вплоть до максимального значения напряжения на тяговых подстанциях не обеспечивает необходимого напряжения на токоприемниках электровозов. В этих случаях приходится разделять зоны путем сооружения промежуточных дополнительных тяговых подстанций. Однако, сооружение дополнительных тяговых подстанций с питанием от линий электропередач высокого напряжения обходится довольно дорого, особенно если присоединение тяговой подстанции к энергосистеме затруднительно и влечет за собой изменение схемы внешнего энергоснабжения с переустройством некоторых промежуточных тяговых подстанций в опорные со всеми связанными с этим дополнительными расходами.

Еще одним вариантом уменьшения потерь электроэнергии и повышения энергоэффективности грузонапряженного участка является перевод системы электроснабжения постоянного тока 3,3 кВ на систему переменного тока 27,5 кВ, которая является более экономичной по сравнению с первой. Однако, необходимо отметить, что такое техническое решение является далеко не бесспорным и, по оценкам специалистов [1], к нему надо подходить взвешенно, после проведения необходимого комплекса технико-экономических расчетов. При этом нужно учитывать, что система переменного тока, по сравнению с системой постоянного тока, с самого начала своего применения постоянно подвергается разного рода модернизациям и усовершенствованиям. За все годы эксплуатации и модернизации так и не были устранены основные недостатки этой системы: опасное электромагнитное влияние, несимметричная загрузка фаз и значительные объемы транзита реактивной энергии [2, 3].

Очередной виток научно-технического прогресса обусловлен бурным развитием силовой электроники и компьютерных технологий. Совершенствование систем электрической тяги и перспективы её развития предопределены необратимым процессом обновления всей системы преобразования энергии, затрачиваемой на перевозочный процесс. Применение преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный ток, тиристорных преобразователей уровня напряжения постоянного тока, создание высокоэкономичных алгоритмов компьютерного управления преобразованием

электроэнергии, замена коллекторных двигателей постоянного тока на бесколлекторные асинхронные трехфазного тока, составляют основное направление технического перевооружения систем электрической тяги и в настоящее время широко используются в ряде промышленно развитых стран [4-6].

Развитие современной силовой электроники, однако, позволяет вести речь о реальной возможности реализации системы постоянного тока с высоким уровнем напряжения. Исследования таких систем ведутся давно и уже доказано, что такие системы по своим технико-экономическим показателям значительно превосходят любые самые современные системы электрической тяги переменного тока. Радикальным способом повышения эффективности функционирования системы тягового электроснабжения, является повышение напряжения в контактной сети постоянного тока до 18...24 кВ. Однако, на наш взгляд, главным ограничивающим фактором является использование системы централизованного электроснабжения.

Значительно усилить тяговое электроснабжение может не только внедрение новейших технологий и современного оборудования, а и применение систем распределенного питания. Принципы построения этих систем были сформулированы проф. Марквардтом К. Г. еще в середине прошлого века. При их применении питание контактной сети осуществляется с помощью преобразовательных пунктов, подключаемых к продольной линии электропередачи повышенного напряжения переменного или постоянного тока. Экономический эффект достигается за счет уменьшения сечения проводов контактной сети, уменьшения потерь энергии, поддержания необходимого уровня напряжения в контактной сети и увеличения коэффициента использования мощности основного энергетического оборудования при снижении его установленной мощности.

На сегодняшний день проработаны несколько вариантов усиления системы постоянного тока 3,3 кВ, при которых не требуется устройства дополнительных присоединений к энергосистеме: сооружение преобразовательных пунктов подпитки 6/3 кВ с фидером постоянного тока 3 кВ (предложение Уральского отделения ЦНИИ МПС), усиление системы энергоснабжения с применением вольтодобавочных устройств (предложение МИИТа) и другие. В работах Кислякова В. А. [7] рассмотрены варианты усиления системы энергоснабжения, которые предусматривают сооружение дополнительных подстанций, установку пунктов подпитки (ППТ), вольтодобавочных устройств (ВДУ), либо их определенные сочетания. Рассмотренным работам присущий общий недостаток – авторы рассматривают устройства усиления как отдельные элементы системы электроснабжения без возможности управления каждым из них в режиме реального времени в единой системе интеллектуального электроснабжения.

Актуальным вариантом усиления системы 3,3 кВ является установка усиливающих пунктов (УП) на межподстанционной зоне, которые будут работать по принципу распределенной системы питания. Усиление на основе распределенного питания предполагает переход к новому схмотехническому решению электротяговой сети. Преимуществом данной системы является лишь надобность в подпитке контактной сети, что не требует дополнительной агрегатной мощности, а при использовании альтернативной энергии значительно снижается расход электрической энергии.

**Целью** данной работы является разработка методологических подходов к расчету системы тягового электроснабжения распределенного типа для последующего определения закона управления отдельными усиливающими пунктами при работе в составе распределенной системы электроснабжения, обеспечивающей необходимый режим напряжения в тяговой сети.

### Основная часть

Выполним оценочные расчеты обеспечения необходимого уровня напряжения в случае установки усиливающего пункта посреди межподстанционной зоны при узловой схеме питания тяговой сети (рис. 1).

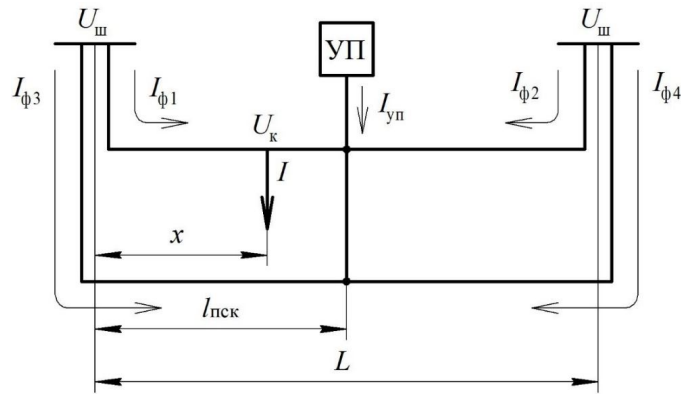


Рис. 1. Расчетная схема участка

Для выполнения расчетов использован реальный профиль мощности тяговой нагрузки, который задается током электроваза при движении по участку (рис. 2). Данные зафиксированы с дискретностью 100 м при опытной поездке на реальном участке.

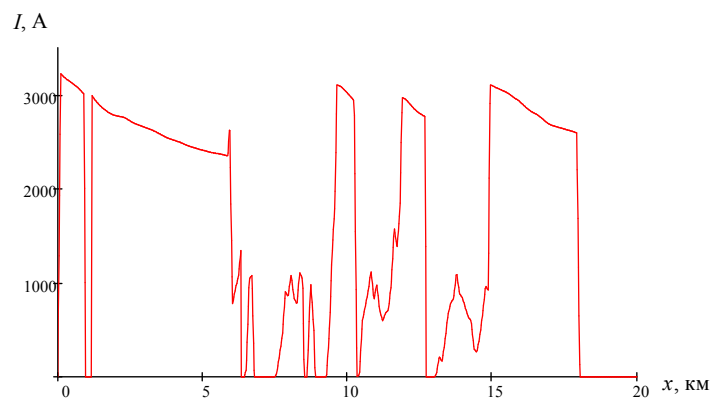


Рис. 2. Расчетная реализация тока скоростного поезда на участке

При проведении расчетов принимались следующие исходные данные и допущения:

Напряжение на шинах тяговых подстанций –  $U_{ш} = 3300 \text{ В}$ ;

Длина расчетного участка –  $L = 20 \text{ км}$ ;

Удельное сопротивление тяговой сети М120+2МФ100+А185+Р65 –  $r_0 = 0,052 \text{ Ом/км}$ ;

Расстояние до ПСК –  $l_{пск} = 10 \text{ км}$ ;

Минимально допустимое значение напряжения на токоприемнике –  $U_{доп} = 2900 \text{ В}$ .

Используя известные соотношения функций токораспределения для узловой схемы питания (1-4) и напряжения (5), определим их значения при движении одного поезда по участку с постоянной скоростью [8, 9]. Зависимости, полученные в результате расчетов, представлены на рис. 3 и рис. 4.

$$I_{\phi 1}(x) = I(x) \times \begin{cases} \left(1 - \frac{L + l_{пск}}{2 \cdot L \cdot l_{пск}} \cdot x\right), & 0 \leq x \leq l_{пск}; \\ \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_{пск} \leq x \leq L; \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{\phi 2}(x) = I(x) \times \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{L-x}{L}\right), & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ \left(1 - \frac{L + l_{\text{пск}}}{2 \cdot L \cdot l_{\text{пск}}} \cdot (L-x)\right), & l_{\text{пск}} \leq x \leq L; \end{cases} \quad (2)$$

$$I_{\phi 3}(x) = I(x) \times \begin{cases} \left(\frac{L - l_{\text{пск}}}{2 \cdot L \cdot l_{\text{пск}}} \cdot x\right), & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_{\text{пск}} \leq x \leq L; \end{cases} \quad (3)$$

$$I_{\phi 4}(x) = I(x) \times \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{L-x}{L}\right), & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ \left(\frac{L - l_{\text{пск}}}{2 \cdot L \cdot l_{\text{пск}}} \cdot (L-x)\right), & l_{\text{пск}} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (4)$$

$$U_{\text{к}}(x) = \begin{cases} U_{\text{ш}} - r_0 \cdot I_{\phi 1}(x) \cdot x, & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ U_{\text{ш}} - r_0 \cdot I_{\phi 2}(x) \cdot (L-x), & l_{\text{пск}} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (5)$$

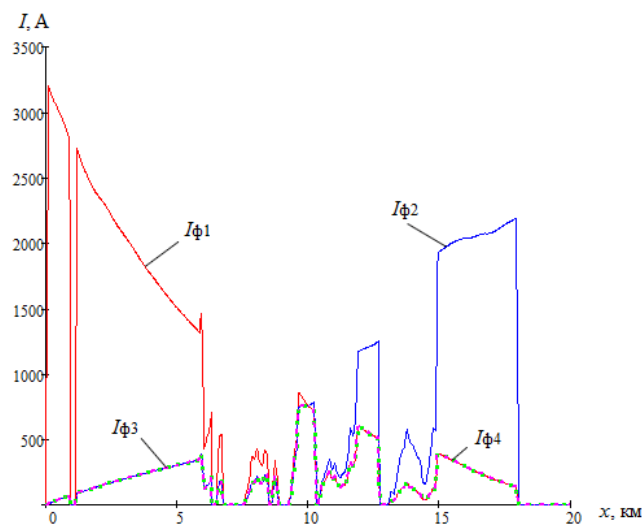


Рис. 3. Токи фидеров тяговых подстанций для расчетного участка

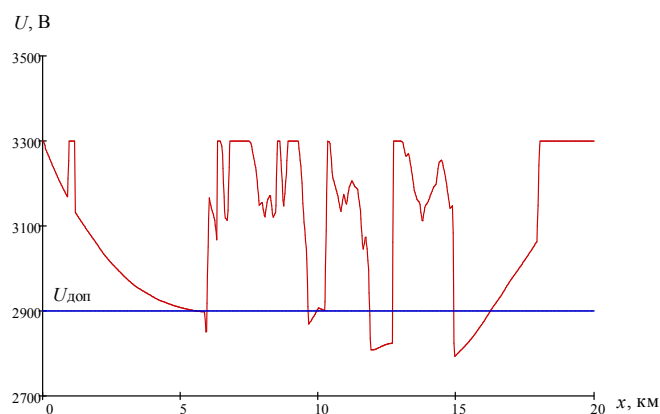


Рис. 4. Напряжение на токоприемнике для расчетного участка

Анализ результатов расчета, представленных на рис. 4 показывает, что существуют точки, в которых уровень напряжения выходит за пределы допустимого значения, что, в свою очередь, показывает необходимость применения усиливающего пункта.

При применении УП изменится токораспределение в тяговой сети. Для этого необходимо пересчитать токи фидеров тяговых подстанций и напряжения с учетом тока усиливающего пункта. Здесь следует отметить, что возможное запираание диодов в преобразователях тяговых подстанций в случае отсутствия тяговой нагрузки и работы усиливающего пункта только на тяговую сеть не учитывается, что позволяет просто дополнить функции распределения токов четвертями тока усиливающего пункта, при условии его подключения на посту секционирования в середине межподстанционной зоны [8].

$$I_{\Phi 1}(x, I_{\text{уп}}) = I(x) \times \begin{cases} \left(1 - \frac{L + l_{\text{пск}}}{2 \cdot L \cdot l_{\text{пск}}} \cdot x\right) - \frac{I_{\text{уп}}}{4}, & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) - \frac{I_{\text{уп}}}{4}, & l_{\text{пск}} \leq x \leq L; \end{cases} \quad (6)$$

$$I_{\Phi 2}(x, I_{\text{уп}}) = I(x) \times \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{L - x}{L}\right) - \frac{I_{\text{уп}}}{4}, & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ \left(1 - \frac{L + l_{\text{пск}}}{2 \cdot L \cdot l_{\text{пск}}} \cdot (L - x)\right) - \frac{I_{\text{уп}}}{4}, & l_{\text{пск}} \leq x \leq L; \end{cases} \quad (7)$$

$$I_{\Phi 3}(x, I_{\text{уп}}) = I(x) \times \begin{cases} \left(\frac{L - l_{\text{пск}}}{2 \cdot L \cdot l_{\text{пск}}} \cdot x\right) - \frac{I_{\text{уп}}}{4}, & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) - \frac{I_{\text{уп}}}{4}, & l_{\text{пск}} \leq x \leq L; \end{cases} \quad (8)$$

$$I_{\Phi 4}(x, I_{\text{уп}}) = I(x) \times \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{L - x}{L}\right) - \frac{I_{\text{уп}}}{4}, & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ \left(\frac{L - l_{\text{пск}}}{2 \cdot L \cdot l_{\text{пск}}} \cdot (L - x)\right) - \frac{I_{\text{уп}}}{4}, & l_{\text{пск}} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (9)$$

$$U_{\text{к}}(x, I_{\text{уп}}) = \begin{cases} U_{\text{ш}} - r_0 \cdot I_{\Phi 1}(x, I_{\text{уп}}) \cdot x, & 0 \leq x \leq l_{\text{пск}}; \\ U_{\text{ш}} - r_0 \cdot I_{\Phi 2}(x, I_{\text{уп}}) \cdot (L - x), & l_{\text{пск}} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (10)$$

Для реальной реализации тока электровоза аналитический расчет необходимого значения тока усиливающего пункта, обеспечивающего заданный режим напряжения, представляет собой сложную задачу. Возможны следующие пути решения:

1) аппроксимация исходной кривой тока, последующее нахождение точек минимума кривой напряжения с помощью дифференцирования и, затем, непосредственный расчет тока по заданному граничному условию в точке экстремума;

2) численный способ расчета тока усиливающего пункта, с последующим приведением исходной кривой тока к одному значению и применением аналитического метода, но уже для постоянного значения.



Для практической реализации численного способа расчета необходимого тока УП разработан алгоритм (рис. 5), суть которого заключается в создании двумерного массива напряжений на токоприемнике электровоза, каждое значение которого определяется двумя параметрами – его координатой и током усиливающего пункта в определенном диапазоне значений с фиксированным шагом. Пример реализации предложенного алгоритма приведен на рис. 6.

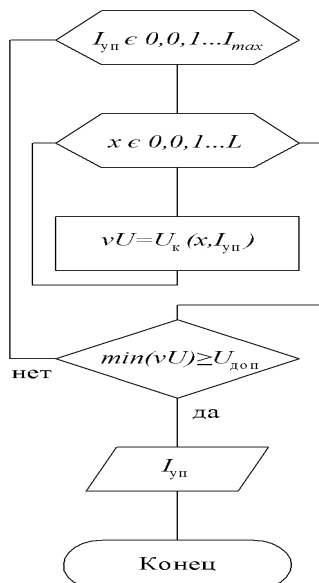


Рис. 5. Алгоритм численного расчета тока усиливающего пункта

```

I_yn(U_dop) :=
  for I_nn ∈ 0..I_nn_max
  | for i ∈ 0..20/0.1
  | | T_i,0 ← i·0.1
  | | T_i,1 ← U_k(i·0.1, I_nn)
  | if min(T_i,1) ≥ U_dop
  | | c ← I_nn + 1
  | | break
  | c ← c - 1

I_yn(2900) = 1589 A
  
```

Рис. 6. Пример реализации в системе MathCAD

Проведя вариантыные расчеты можно получить характеристику зависимости минимального, среднего и максимального значения напряжения во время движения поезда в зависимости от тока усиливающего пункта (рис. 7). На номограмме диапазон токов УП, которые удовлетворяют значению максимально допустимого тока контактной подвески при соблюдении режима напряжения в тяговой сети, обозначен заштрихованной областью.

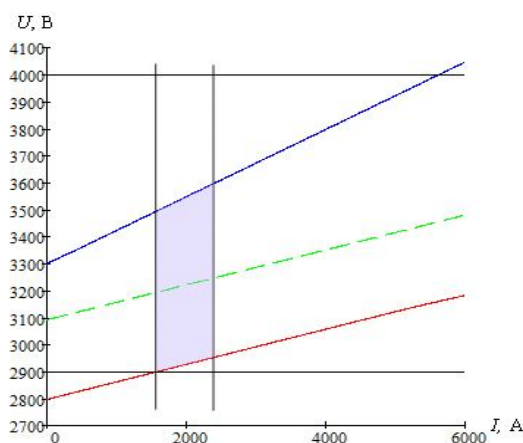


Рис. 7. Номограммы для определения предельных значений тока одного усиливающего пункта

Известно, что уровень напряжения является определяющим фактором только в случае максимального использования электровозом силы тяги, что не выполняется в реальных условиях, и должен рассматриваться как некоторый параметр, оптимизирующий передачу и потребление электроэнергии для электроподвижного состава [10]. Необходимо отметить, что управляющими параметрами для существующих систем управления режимом напряжения являются уровни напряжения на шинах тяговых подстанций, постах секционирования и

падение напряжения в тяговой сети до поста секционирования, а также среднеквадратичное отклонение напряжения на шинах тяговой нагрузки [11–13]. При движении поезда по участку энергия потребляется не непрерывно, так как имеются различные режимы движения в зависимости от профиля пути и других условий движения. Время потребления тока  $t_r$  может изменяться от 70–80 % до 100 % времени хода. Ток, потребляемый поездом, является случайной функцией времени, так как на его величину влияет большое количество факторов (отклонение основного сопротивления движению, метеорологические условия, отклонения веса состава, индивидуальные свойства машиниста и др.). Напряжение на токоприемнике электровоза также является случайной функцией. Отсюда, для эффективного функционирования системы управления режимом тяговой сети напряжение должно изменяться в зависимости от величины тока и длительности его протекания.

Анализ результатов вариантных расчетов, представленных на рис. 8 показывает, что соблюдение необходимого режима напряжения в тяговой сети возможно при токе УП, сопоставимом с током тяговой подстанции. Таким образом, необходимо усовершенствовать алгоритм расчета для оптимизации мощности усиливающего пункта.

Для этого необходимо выполнить поиск некоторого значения тока электровоза, которое позволит использовать аналитические методы расчета необходимой мощности усиливающего пункта, обеспечивая тем самым приемлемую точность. Попытки использовать в аналитических расчетах среднеквадратического значения на всем интервале и на интервале времени хода поезда требуемой точности не обеспечили.

Для возможности выполнения аналитического расчета [14] введем понятие приведенного тока электровоза, которым будем считать некий постоянный ток, при потреблении которого в процессе движения поезда минимум напряжения в контактной сети возникнет в той же точке, что и для конкретной реализации тягового тока поезда. Математически значение этого тока можно получить путем решения системы уравнений (11), которая представляет собой поиск минимального значения тока из всего множества, определяемого из неравенства разностей напряжений, полученных аналитически и численно, когда координата пути стремится к точке минимума напряжения в контактной сети (рис. 8), т. е.

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow x_{U_{\min}}} [U_k(x, I_{\text{пр}}) - U_k(x, I(x))] \geq 0; \\ I_{\text{пр}}|_{U > U_{\text{доп}}} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (11)$$

Для принятых исходных данных это значение составит 3061 А.

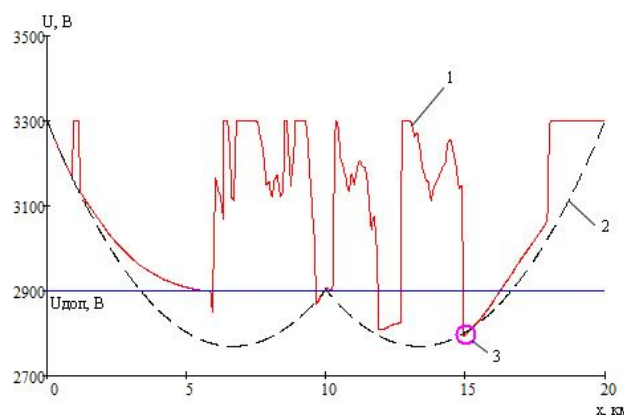


Рис. 8. Графики изменения напряжений в контактной сети: 1 — для конкретной тяговой реализации тока ; 2 — для приведенного тока; 3 — расчетная точка



Для нахождения тока усиливающего пункта сначала необходимо определить координаты минимума напряжения, используя выражение

$$U'(x) = \begin{cases} r_0 \cdot \left( \frac{I_{уп}}{4} + I_{пр} \cdot \left( \frac{x \cdot (L + l_{пск})}{2 \cdot L \cdot l_{пск}} - 1 \right) \right) + \frac{I_{пр} \cdot r_0 \cdot x \cdot (L + l_{пск})}{2 \cdot L \cdot l_{пск}}; \\ -r_0 \cdot \left( \frac{I_{уп}}{4} + I_{пр} \cdot \left( \frac{(L - x) \cdot (L + l_{пск})}{2 \cdot L \cdot l_{пск}} - 1 \right) \right) + \frac{I_{пр} \cdot r_0 \cdot (L - x) \cdot (L + l_{пск})}{2 \cdot L \cdot l_{пск}}, \end{cases} \quad (12)$$

получим

$$x_{U_{\min}} = \begin{cases} \frac{L \cdot l_{пск} \cdot \left( I_{пр} - \frac{I_{уп}}{4} \right)}{I_{пр} \cdot (L + l_{пск})}; \\ \frac{4 \cdot I_{пр} \cdot L^2 + I_{уп} \cdot L \cdot l_{пск}}{4 \cdot I_{пр} \cdot L + 4 \cdot I_{пр} \cdot l_{пск}}. \end{cases} \quad (13)$$

Решая последнюю систему уравнений (13), получим две точки минимума напряжения с координатами 6,67 и 13,33 км. Подставив эти значения в формулу (10), получим значение тока усиливающего пункта

$$I_{уп} = - \frac{32 \cdot I_{пр} \cdot (L + l_{пск}) \cdot \left( \sqrt{\frac{L \cdot l_{пск} \cdot r_0 \cdot (U_{ш} - 2900)}{8 \cdot I_{пр} \cdot (L + l_{пск})}} + \frac{L \cdot l_{пск} \cdot r_0}{8 \cdot (L + l_{пск})} \right)}{L \cdot l_{пск} \cdot r_0} \quad (14)$$

$$I_{уп} = 1612,841 \text{ A}$$

При использовании усиливающего пункта с рассчитанным током, график напряжения примет вид (рис. 9).

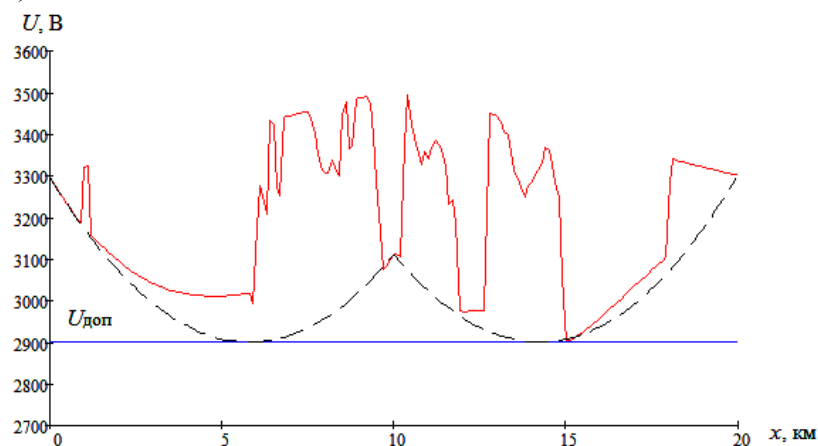


Рис. 9. Напряжение на токоприемнике при включении усиливающего пункта

Из анализа результатов расчетов, представленных на рис. 9 следует, что напряжение на токоприемнике электровоза при включении УП соответствует минимально допустимому уровню. Кроме того, соблюдается заданный режим напряжения в тяговой сети. Необходимо также отметить, что рассмотренная методика расчета может быть распространена и на большее количество усиливающих пунктов, что позволит обеспечить необходимый режим напряжения с наперед заданными статистическими характеристиками. При этом может быть

снижена не только необходимая мощность усиливающих пунктов, но и потери электрической энергии в тяговой сети.

### Выводы

1. Существующие способы усиления централизованной системы тягового электроснабжения не в полной мере обеспечивают достаточный уровень напряжения при разных эксплуатационных условиях. Альтернативным способом обеспечения необходимого режима напряжения является распределенная система электроснабжения с применением автономных усиливающих пунктов на межподстанционной зоне, позволяющая регулировать напряжение в заданном диапазоне.

2. Приведенная в данной работе методология расчета показывает, что при определенном значении тока усиливающего пункта и изменении их количества можно регулировать напряжение в контактной сети в заданных пределах.

3. Полученные результаты создают методологическую основу построения распределенной системы питания тяговой сети постоянного тока с усиливающими пунктами с возможностью управления каждым из них в режиме реального времени в единой системе интеллектуального электроснабжения.

### Список использованной литературы:

1. О переходе с постоянного тока на переменный [Текст] // Железные дороги мира. № 6, 2013, С. 68–71.
2. Prudenzi A. (2003) Estimation of Electrical Traction Load Harmonic Impact on Distribution Networks // IEEE, P. 1166–1171.
3. Босий Д. О. Комплексна оцінка показників якості електроенергії на тягових підстанціях змінного струму [Текст] / Д. О. Босий // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, № 4 (46), 2013. – С. 30–37.
4. Бадер М. П., Сыченко В. Г. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения [Текст] / М. П. Бадер, В. Г. Сыченко // Технічна електродинаміка, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність, Ч. 2., 2009. – С. 88–93.
5. Hill R.J. (1994) Electric railway traction. Part 3: Traction power supplies // Power Engineering Journal, Vol. 8, No. 6, P. 275–286
6. Hill R.J. (1993), Carpenter D.C. Rail Track Distributed Transmission Line Impedance and Admittance: Theoretical Modeling and Experimental Results // IEEE transactions on vehicular technology, vol. 42, no. 2, P. 225–241
7. Кисляков В. А. Сравнительная оценка технических показателей различных способов усиления электрифицированных линий постоянного тока [Текст] / МИИТ, 1978, вып. 604 – 3 – 21 с.
8. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрических железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. М.: Трансжелдориздат, 1958, 288 с.
9. Mariscotti, A. (2003) Distribution of the traction return current in AC and DC electric railway systems // Power Delivery, IEEE Transactions, Vol. 18, No. 4, P. 1422–1432.
10. Сыченко В. Г. Выбор управляющего критерия при разработке микропроцессорной адаптивной системы регулирования на шинах тяговой подстанции. [Текст] // Межвузовский сборник научных трудов / Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта - Днепропетровск, 1999. – С. 166–172.
11. Сиченко В. Г. Дослідження електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму: проблеми, технічні засоби та реалізація [Текст] / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, Д. О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – № 2, 2011. – С. 58–63.
12. Сиченко, В. Г. Показники якості електроживлення у тягових мережах постійного струму [Текст]: зб. наук. праць/ В. Г. Сиченко // Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. Спец. випуск, Частина 2. Київ, 2011. – С. 5–13.
13. Сиченко В. Г. Якість напруги на шинах тягового навантаження підстанцій постійного струму [Текст] / В. Г. Сиченко // Електрифікація транспорту, № 6, 2013. – С. 58–63.
14. Босий Д. О. Необхідність застосування керованих підсилюючих пунктів для стабілізації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу уздовж електрифікованої ділянки постійного

струму [Текст] / Д. О. Босий, Є. М. Косарев // 74 Міжнародна науково-практична конференція Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту, Дн-ськ, 15-16 травня 2014. – С. 150–151.

### References

1. *About the transition from DC to AC* ["O perekhode s postoyannogo toka na peremennyi", Zheleznye dorogi mira], № 6, 2013, P. 68–71.
2. Prudenzi A. (2003), Estimation of Electrical Traction Load Harmonic Impact on Distribution Networks // IEEE 2003, P. 1166–1171
3. Bosiy D. A. (2013), *Comprehensive evaluation of power quality at AC traction substations* ["Kompleksna otsinka pokaznikov yakosti elektroenergii na tyagovikh pidstantsiyakh zminnogo strumu", Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana] № 4 (46), – P. 30–37.
4. Bader M. P., Sychenko V. G. (2009), *The concept of renewal and prospects technical development of the traction power supply* ["Kontseptsiya obnovleniya i perspektivy tekhnicheskogo razvitiya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya", Tekhnichna elektrodinamika, Temat. vip. Silova elektronika ta energoefektivnist'], P. 88–93.
5. Hill R.J. (1994), Electric railway traction. Part 3: Traction power supplies // Power Engineering Journal, Vol. 8, No. 6, P. 275–286.
6. Hill R. J. (1993), Carpenter D.C. Rail Track Distributed Transmission Line Impedance and Admittance: Theoretical Modeling and Experimental Results // IEEE transactions on vehicular technology, vol. 42, no. 2, p. 225–241
7. Kislyakov V. A. (1978), *Comparative evaluation of different methods of technical indicators gain DC electrified lines* ["Sravnitel'naya otsenka tekhnicheskikh pokazatelei razlichnykh sposobov usileniya elektrifitsirovannykh liniy postoyannogo toka", MIIT], Vol. 604, P. 3–21.
8. Markvardt K. G. (1958), *Power supply electric railways* [Elektrosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog], Transzheldorizdat, Moscow, 288 p.
9. Mariscotti, A. (2003) Distribution of the traction return current in AC and DC electric railway systems // Power Delivery, IEEE Transactions, Vol. 18, No. 4, P. 1422–1432.
10. Sichenko V. G. (1999), *Selection of the control criterion in the development of microprocessor-based adaptive control system for tire traction substation* ["Vybor upravlyayushchego kriteriya pri razrabotke mikroprotsessornoi adaptivnoi sistemy regulirovaniya na shinakh tyagovoi podstantsii", Mezhdvuzovskii sbornik nauchnykh trudov. Transport. Povyshenie effektivnosti raboty ustroystv elektricheskogo transporta], P. 166–172.
11. Sichenko V. G. (2011), *The study of electromagnetic processes in the supply of traction elektroposta  $\rightarrow$  DC: problems, hardware and implementation* ["Doslidzhennya elektromagnitnykh protsesiv u sistemi tyagovogo elektropostachannya postiinogo strumu: problemi, tekhnichni zasobi ta realizatsiya", Informatsiino-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti], № 2, P. 58–63.
12. Sichenko V. G. (2011), *Quality parameters of the traction power network DC* ["Pokazniki yakosti elektrozhivlennya u tyagovikh merezhakh postiinogo strumu", Pratsi institutu elektrodinamiki Natsional'noi akademii nauk Ukraini. Spets. випуск, Chastina 2], P. 5–13.
13. Sichenko V. G. (2013), *The quality of the voltage across the load the tire traction substation DC* ["Yakist' naprugi na shinakh tyagovogo navantazhennya pidstantsii postiinogo strumu", Elektrifikatsiya transportu], № 6, P. 58–63.
14. D. O. Bosiy, E. M. Kosarev (2014), *The need for reinforcing points managed to stabilize the voltage at the pantograph electromotive composition along the electrified section DC* ["Neobkhdnist' zastosuvannya kerovnykh pidsilyuyuchikh punktiv dlya stabilizatsii naprugi na strumopriimachakh elektrorukhomogo skladu uzдовzh elektrifikovanoi dilyanki postiinogo strumu", 74 Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya Problemi ta perspektivi rozvitku zaliznichnogo transportu], P. 150–151.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.